

高强度低应力气缸体立浇铸造工艺研究

石 峰, 杨芳霞, 吕登红

(广西玉柴机器股份公司, 广西玉林 537005)

摘要: 针对柴油机干湿缸套结构的气缸体特点及其铸造工艺上的技术难点, 在分析气缸体铸件缺陷产生原因的基础上, 探索研究了一种高强度低应力气缸体立浇铸造工艺方法。通过生产验证, 该研究的铸造工艺方法是成功有效的, 可为类似零件的铸造提供指导。

关键词: 气缸体; 铸造工艺; 立浇

气缸体作为柴油发动机的重要部件, 其技术要求非常严格, 尤其是干湿缸套结构的气缸体, 要求轻量化、尺寸精度高及铸件力学性能好^[1]。本文以我公司生产某新型6缸的干湿缸套结构的气缸体为例, 介绍了气缸体的结构特点和技术要求, 分析了其铸造工艺上的技术难点, 然后提出新的铸造工艺设计方案以及为解决铸件缺陷所采取的多项工艺措施, 从而保证了该新型6缸气缸体的铸造成功, 提高了生产率, 为公司提高市场占有率提供了保证。同时也为类似零件的铸造提供指导。

1 产品结构特点及铸造工艺难点

1.1 产品结构特点及技术要求

本气缸体为6缸干湿缸套结构的柴油机气缸体, 其尺寸约为: 780 mm × 430 mm × 330 mm, 零件重量约为140 kg, 零件的基本壁厚为5.0 mm, 水套最薄处壁厚3 mm, 铸件尺寸精度要求达到GB/T 6414 中CT8 ~ CT9 级。其特点是水套砂芯细长、缸孔之间窄小、结构复杂, 如图1所示。

气缸体的铸件材质为HT300, 本体硬度HB200~225, A型石墨, 珠光体含量≥98%, 本体抗拉强度≥300 MPa^[2]; 免退火工艺, 铸件残余应力≤55 MPa。

1.2 铸造工艺难点分析

图2是通过UG软件设计的水套砂芯。由图2可见, 砂芯长820 mm, 宽140 mm, 最薄壁厚3 mm, 砂芯细长, 砂芯强度较低, 容易变形、断裂^[3]。砂芯被金属液包围, 缸孔之间的细小窄缝容易产生烧结缺陷, 清理困难, 导致铸件水腔堵死报废, 铸造难度较大。

作者简介:

石 峰 (1982-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为铸造工艺开发。电话: 13877581012, E-mail: LDH11988@163.com

中图分类号: TG146.21

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977 (2023) 01-0067-05

收稿日期:

2021-03-28 收到初稿,
2022-04-29 收到修订稿。

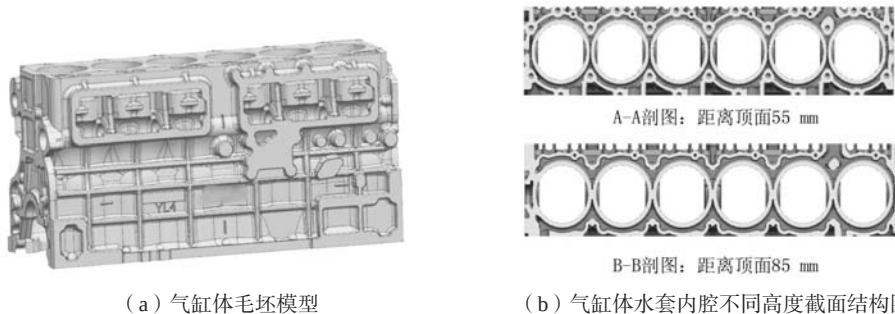


图1 气缸体铸件及其水套结构

Fig. 1 Structures of the cylinder block casting and water jacket

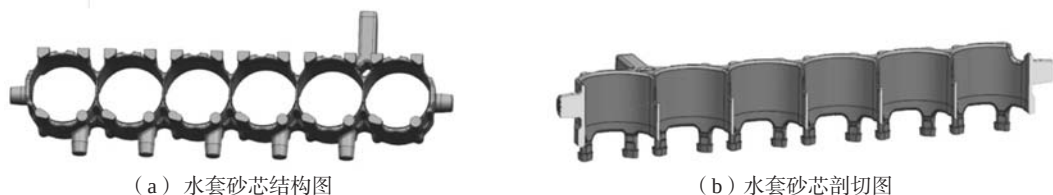
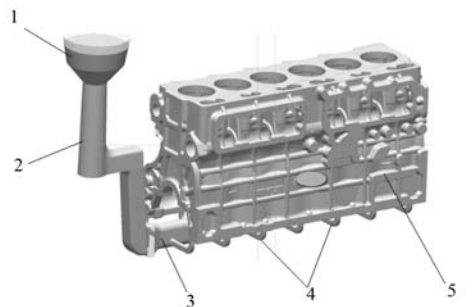


图2 水套砂芯结构图

Fig. 2 Structure of the water jacket and core

2 铸造工艺设计方案

作为带有缸套结构的气缸体，为了防止水套砂芯断裂及缸套之间烧结缺陷，确保铁液浇注平稳充型，有利于排气畅通，采用缸顶面朝上垂直放置的立浇方式，设计从底面机脚进铁液的底注立浇式的浇注系统^[4]。此浇注系统优点是：充型平稳、铸型排气顺畅、凝固收缩相对均匀，可达到低应力效果。采用开放式浇注系统， $\sum F_{直} : \sum F_{横} : \sum F_{内} = 1 : 1.3 : 1.25$ ，其中直浇道面积 $\sum F_{直} = 2\,826\text{ mm}^2$ 。浇注系统具体见图3。



1. 浇口杯 2. 直浇道 3. 横浇道 4. 内浇口 5. 气缸体铸件

图3 气缸体立式浇注系统设计

Fig. 3 Design of the vertical gating system of the cylinder block

2.1 充型温度分析

运用MAGMA软件对工艺方案整个充型过程的温度分布规律进行模拟分析，仿真结果显示，浇注位置对抑制湍流有很大的影响，铸件的充型温度均不低于 $1\,277\text{ }^{\circ}\text{C}$ （液相线温度），所铸出的铸件出现冷隔缺陷的风险较低，如图4所示。

2.2 充型速度分析

运用MAGMA软件对工艺方案进行充型速度模拟分析，仿真结果显示，除了刚开始的1 s时间段内有较高的充型速度外，最高的充型速度不高于 1.7 m/s ，且最高速度始终在直浇道内；整个充型过程中浇注速度平稳，表明了铸件充型顺畅，浇注系统结构设计合理，所铸出的铸件产生气孔缺陷的倾向较小，如图5所示。

2.3 凝固及缩孔分析

运用MAGMA软件对工艺方案进行凝固及缩孔模拟分析^[5]，仿真结果显示，整个铸件凝固收缩充分，铸件生产缩孔缺陷的风险低，如图6所示。

根据图6d的凝固结果，在安装冷却器厚大位置处

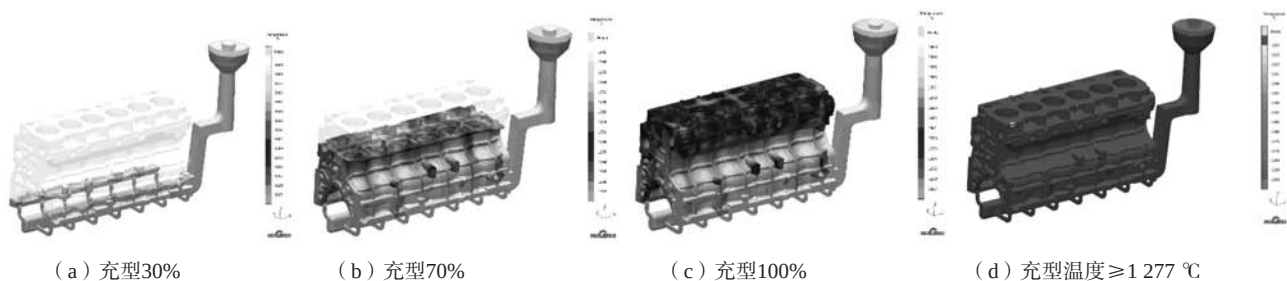


图4 充型温度分析

Fig. 4 Filling temperature analysis

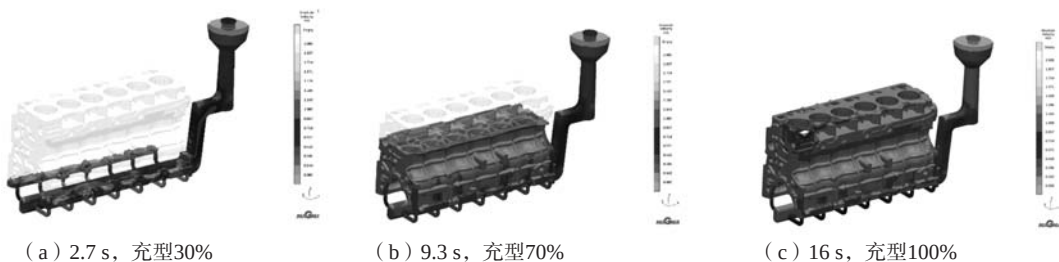


图5 浇注速度分析

Fig. 5 Pouring speed analysis

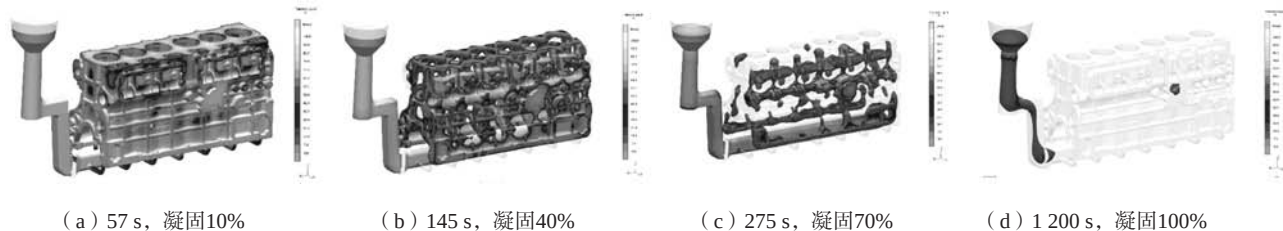


图6 凝固及缩孔分析

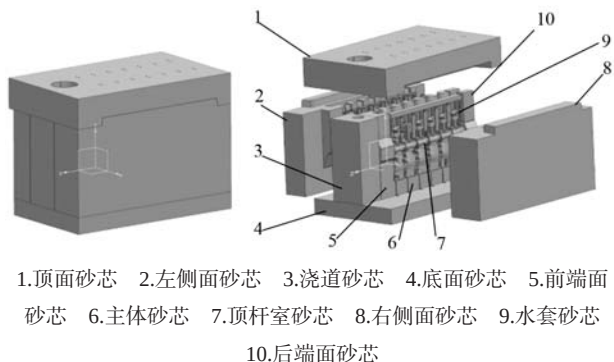
Fig. 6 Solidification and shrinkage analysis

有产生缩孔的风险,为了消除这一风险,在该位置处加外冷铁。

利用MAGMA软件,通过对铸件的充型温度、充型速度、气流、凝固及缩孔等模拟分析,认为整个浇注系统下的充型温度分布均衡、快速平稳、无卷气湍流、铸件补缩充分,气孔缩孔风险低等,因此铸造工艺方案设计合理。

3 铸型工艺

整个铸型全部由砂芯组成,采用全包围结构砂芯装配工艺,砂型和砂芯全部采用3D打印方式制造。铸型砂芯装配模型见图7。



1.顶面砂芯 2.左侧面砂芯 3.浇道砂芯 4.底面砂芯 5.前端面砂芯 6.主体砂芯 7.顶杆室砂芯 8.右侧面砂芯 9.水套砂芯 10.后端面砂芯

图7 铸型砂芯装配模型

Fig. 7 Model of the casting and core assembly

根据各砂芯的结构形状及作用,采用两种不同的芯砂工艺方案。

(1) 工艺方案一。除水套砂芯及顶杆室砂芯外,其余的砂芯全部用普通石英砂冷芯,砂芯的技术要求如下:即时抗拉强度 ≥ 1.2 MPa,常温抗拉强度 ≥ 1.5 MPa,发气量 ≤ 25 mL/g。根据砂芯的技术参数,方案一的芯砂配方为:新砂(石英砂)100%,树脂1.6%~2.2%(占砂重),固化剂30%~60%(占树脂重

量,根据天气温度调整)。

(2) 工艺方案二。水套砂芯及顶杆室砂芯,形状细长及偏薄,难点是砂芯强度很低,容易变形、断裂及烧结。砂芯用铬铁矿砂,砂芯的技术参数要求如下:水套砂芯的即时抗拉强度 ≥ 1.2 MPa,常温抗拉强度 ≥ 1.5 MPa,发气量 ≤ 25 mL/g。

根据砂芯的技术参数,水套砂芯及顶杆室砂芯的芯砂配方如下:铬铁矿砂30%,新砂30%,再生冷芯砂40%,HA树脂中组分Ⅰ占0.9%,组分Ⅱ占0.9%,HA固化剂占树脂重的1%~2%。

4 熔炼工艺

炉料配比,按HT300材质配料,具体配比:生铁10%,回炉铁25%(其中铁锭5%),废钢65%(边角料废钢35%,压包废钢30%)。铁液温度控制:精炼温度1 500~1 530 $^{\circ}\text{C}$,出铁温度1 470~1 520 $^{\circ}\text{C}$,浇注温度1 360~1 430 $^{\circ}\text{C}$ 。

一次孕育使用硅钙钡孕育剂,加入量0.24%;二次孕育加入量0.06%~0.1%。铁液成分要求见表1。

5 铸件免退火工艺

铸件浇注后约20 h开箱,温度理论上应为290 $^{\circ}\text{C}$,25 h开箱温度理论上应为190 $^{\circ}\text{C}$,27 h开箱温度理论上应为150 $^{\circ}\text{C}$,使用传感器来创建冷却曲线,从472 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围可以预期每小时可以冷却约20 $^{\circ}\text{C}$,这意味着铸件在约20~21 h后应达到290~270 $^{\circ}\text{C}$ 的温度。铸件冷却温度数据见图8。

6 试验结果与分析

6.1 铸件应力检测

共检测2台铸件,检测点位置见图9。

表1 铁液成分控制表

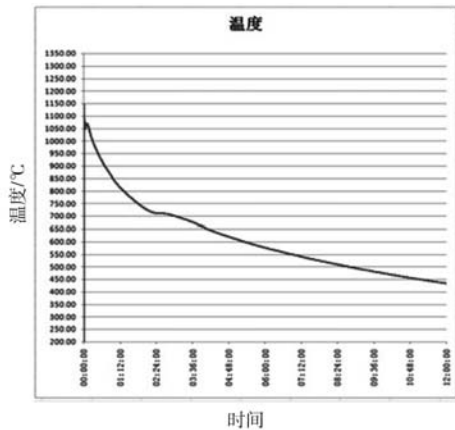
Table 1 Composition control table of the iron liquid

 $w_B/\%$

项目	C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Sn	Ni
原铁液	3.00~3.10	1.40~1.55	0.60~0.80	0.04~0.06	≤ 0.06	≤ 0.15	≤ 0.15	≤ 0.005	0.05~0.07
终铁液	3.95~3.20	1.65~1.95	0.50~0.80	0.04~0.06	≤ 0.06	≤ 0.15	≤ 0.15	≤ 0.005	<0.15

浇注后时间time (h)	温度(°C) temperature	温度下降速度(°C/h) Rate of temperature drop
1	841	
2	731	110
3	700	31
4	655	45
5	610	45
6	575	35
7	545	30
8	518	27
9	494	24
10	472	22
11	451	21
12	433	18

(a) 冷却温度及速度



(b) 温度冷却曲线

图8 气缸体铸件冷却曲线和速度

Fig. 8 Cooling curve and velocity of the cylinder block casting

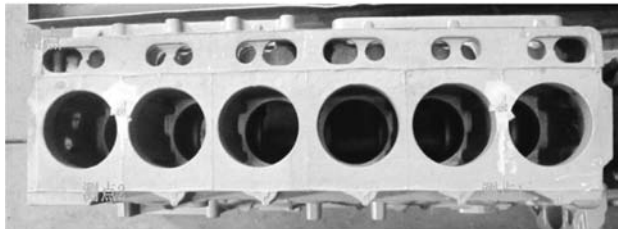


图9 气缸体毛坯测点位置图

Fig. 9 Measuring point position of the cylinder block blank

铸件残余应力检测国内比较常用的是盲孔法测量,其测量流程如下:

清洗工作表面→应力测量仪进行热机20 min(与清洗工作表面同时进行)→应变片的粘贴→焊接导线→安装钻具对中→恒温条件钻孔→钻完孔后,待3 min数据稳定后,测读应力仪读数并打印结果。检测结果见表2。气缸体毛坯最大主应力如图10所示。

表2 气缸体铸件免退火工艺应力测试结果
Table 2 Test results of the stress of the cylinder block casting with free annealing process

材料	铸造编号	测点	应变1	应变2	应变3	主应力/MPa σ_1
			ε_1	ε_2	ε_3	
HT300	BF05D481	1	-31	43	34	15.8
		2	-55	-64	42	28.5
	BF05D482	1	-56	32	55	20.9
		2	-61	-59	-18	36.6

根据上述的结果,毛坯最大主应力36.6 MPa,优于企业标准气缸体铸件残余应力 ≤ 50 MPa。

6.2 本体力学性能

(1) 抗拉强度。取样部位为气缸体第三档轴承位,具体见表3。

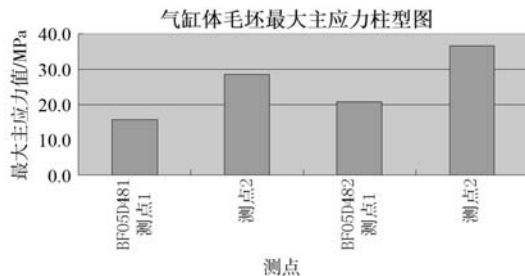


图10 气缸体毛坯最大主应力柱形图

Fig. 10 Maximum principal stress column diagram of the cylinder block blank

表3 本体抗拉强度检测结果
Table 3 Tensile strength test results of the body

铸造编号	厚度 /mm	检测 位置	检测值 /MPa	平均值 /MPa	技术要求/MPa
BF05D481	34	第三档下	313	302.5	≥ 300
	25	第三档上	292		
BF05D482	33	第三档下	316	307	≥ 300
	26	第三档上	298		

(2) 硬度及金相。取样位置为轴承档第三档对应上方两缸之间,检测结果见表4。

铸件本体的金相图如图11所示。

6.3 铸件质量

铸件解剖件显示铸件内腔清洁干净,无粘砂、烧结、脉纹缺陷,厚大部位没有缩孔^[6],如图12。

表4 本体硬度及金相检测结果
Table 4 Hardness and metallographic test results of the body

铸造编号	硬度HB	石墨形态	石墨长度	珠光体	磷共晶+碳化物
BF05D481	206	A	4级	95	2
BF05D482	203	A	4级	95	2

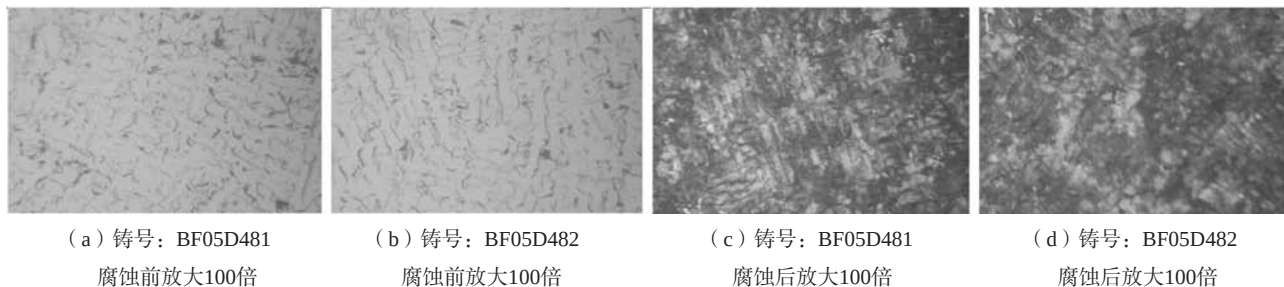


图11 金相组织

Fig. 11 Metallographical microstructures of the casting

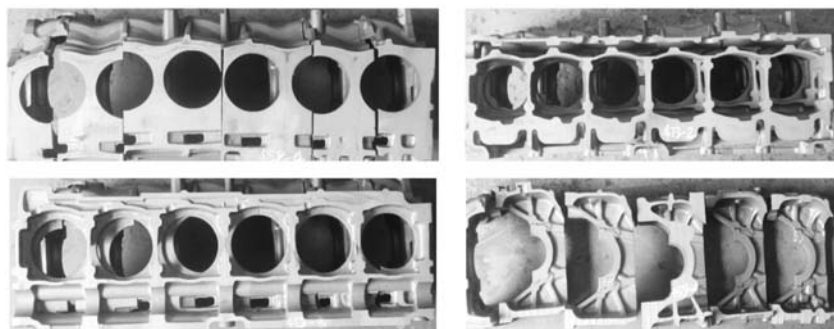


图12 铸件解剖实物图

Fig. 12 Anatomical pictures of the casting

7 结束语

通过分析某型号6缸干湿缸套结构柴油机气缸体的铸件特点及其技术要求,从工艺设计、制芯、浇注、免退火等方面进行工艺技术创新,铸造出高牌号低应

力的高质量柴油机气缸体,最终探索出一种高强度低应力铸铁气缸体立式底注铸造工艺方法,可为类似零件的铸造提供指导。

参考文献:

- [1] 宋振华. 提高发动机铸件质量的工艺改进 [J]. 汽车工艺与材料, 2005 (3): 19-20.
- [2] 宁军. 康明斯KV12汽缸体内在质量的控制 [J]. 重发科技, 2004 (3): 30-31.
- [3] 陈位铭. 关于高质量汽缸体铸造工艺问题的探讨 [J]. 铸造, 2006 (11): 1195-1197.
- [4] 傅显珍, 宁科明, 吕登红, 等. YC6M 气缸盖侧浇铸造新工艺 [J]. 热加工工艺, 2008, 37 (11): 126-127.
- [5] 贾浩敏. 铸件凝固过程中缩松、缩孔预测及数值模拟优化 [J]. 热加工工艺, 2008, 37 (17): 51-53, 57.
- [6] 陈国桢. 铸件缺陷和对策手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

Research on Vertical Casting process of Cylinder Block with Based on High Strength and Low Stress

SHI Feng, YANG Fang-xia, LÜ Deng-hong

(Guangxi Yuchai Machinery Group Co., Ltd., Yulin 537005, Guangxi, China)

Abstract:

In view of the characteristics of dry and wet cylinder block of diesel engine and the technical difficulties in its casting process, a vertical gating system for high strength and low stress cylinder block was explored based on the analysis of the causes of cylinder block casting defects. Through production verification, the casting process method studied was successful and effective, which can provide a guidance for the casting of similar parts in the future.

Key words:

cylinder block; casting process; vertical pouring